

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství

Katedra materiálů a technologií pro automobily



**STRUKTURNÍ ROZBOR NIKLOVÉ SUPERSLITINY INCONEL
713LC**

**STRUCTURAL ANALYSIS OF NICKEL SUPERALLOY
INCONEL 713LC**

Autor práce: Filip Lubina

Vedoucí práce: prof. Ing. Zdeněk Jonšta, CSc.

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra materiálů a technologií pro automobily

Zadání bakalářské práce

Student:

Filip Lubina

Studijní program:

B3923 Materiálové inženýrství

Studijní obor:

3911R034 Materiály a technologie pro automobilový průmysl

Téma:

Strukturní rozbor niklové superslitiny INCONEL 713 LC
Structural analysis of nickel superalloy INCONEL 713LC

Zásady pro vypracování:

- 1.Úvod
- 2.Procesy degradace materiálů za vysokých teplot
- 3.Charakteristika niklových superslitin
- 4.Strukturní analýza superslitiny INCONEL 713LC
- 5.Diskuze a závěr

Seznam doporučené odborné literatury:


- 1.Hernas,A.,Jonšta,Z.,et.al.: Žárupevné oceli a slitiny, 2.vyd.VŠB-TUO,2009,392 s.
- 2.Donachie,M.,J.,Donachie,S.,J.:Superalloys: a technical guide,2.vyd.USA,2002,439 s.
- 3.Mazancová,E.: Materiály pro náročné aplikace,katedra materiálového inženýrství,VŠB-TU Ostrava,2008.studijní opora,62 s.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Zdeněk Jonšta, CSc.**

Datum zadání: 28.11.2014

Datum odevzdání: 30.04.2015


doc. Ing. Petr Tomčík, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty

Zásady pro vypracování bakalářské práce

I.

Bakalářskou prací (dále jen BP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání bakalářské práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 6. Obsah BP |
| 2. Originál zadání BP | 7. Textová část BP |
| 3. Zásady pro vypracování BP | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 9. Přílohy |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání BP obdrží student na oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování bakalářské práce“ následují za originálem zadání BP. („Zásady pro vypracování bakalářské práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání BP. V případě, že BP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnícké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním BP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah BP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech číslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části BP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část BP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním BP;
- Vlastní rozpracování BP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků BP z hlediska stanoveného zadání.

BP nemusí obsahovat experimentální (aplikační) část.

BP bude zpracována v rozsahu min. 25 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman (nebo podobné) 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na

ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost.

U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury.

Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

- ad 8) BP bude obsahovat alespoň 10 literárních odkazů, z toho nejméně 3 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu BP.

- ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části, např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Bakalářskou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *BAKALÁŘSKÁ PRÁCE*


dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě.

IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování bakalářské práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem bakalářského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2014/2015.

Ostrava 4. 11. 2014


Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo.)
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické formě uložena v databázi Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB–TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách), bez ohledu na výsledek její obhajoby.
- **Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval samostatně.**

V Ostravě :.....

Podpis studenta:.....

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce panu prof. Ing. Zdeňku Jonšovi, CSc. za odborné vedení, pomoc, trpělivost, cenné rady a v neposlední řadě hlavně za vstřícnost.

Abstrakt

Tématem této bakalářské práce je strukturní rozbor niklové superslitiny INCONEL 713LC. Bakalářskou práci jsem rozdělil na teoretickou a praktickou část.

V teoretické části jsem popsal obecné charakteristiky niklu, včetně jejich rozdělení. Následně jsem se zaměřil na superslitiny niklu, konkrétně superslitinu INCONEL 713LC.

V praktické části jsem provedl strukturně-fázová analýzu superslitiny INCONEL 713LC pomocí světelného mikroskopu Olympus GX51 a řádkovacího elektronového mikroskopu JEOL JSM 6490LV za účelem zjištění lící struktury a minoritních fází. Také jsem provedl rozbor chemického složení, pomocí fluorescenční rentgenové spektrometrie.

Klíčová slova

Nikl, superslitina, INCONEL 713LC, strukturně-fázová analýza, chemické složení

Abstract

The main aim of bachelor thesis is the structural analysis of nickel-base superalloy INCONEL 716LC. The bachelor thesis is divided into theoretical and practical part.

The theoretical part generally describes the characteristics of nickel-based superalloys including sorting of individual superalloys. Subsequently, attention is focused on nickel superalloys, in particular super alloy INCONEL 713LC.

In the practical part is performed structural and phase analysis of superalloy INCONEL 713LC by light microscope Olympus GX51 and scanning electron microscope JEOL JSM 6490LV to determine the casting structure and minority phases. Analysis of chemical composition by fluorescent X-ray spectrometry had been performed as well.

Keywords

Nickel, superalloy, INCONEL 713LC, structural and phase analysis, chemical composition

Obsah

2.	ÚVOD.....	10
3.	CHARAKTERISTIKA NIKLOVÝCH SUPERSLITIN.....	11
3.1	Obecná charakteristika Niklu	11
3.2	Konstrukční slitiny.....	12
3.3	Slitiny se zvláštními fyzikálními vlastnostmi.....	13
4.	PROCESY DEGRADACE MATERIÁLŮ ZA VYSOKÝCH TEPLŮT	14
4.1	Tečení materiálu (CREEP)	15
4.2	Křivka tečení.....	15
4.3	ODOLNOST VŮČI CREEPU.....	17
5.	ŽÁRUPEVNÉ SLITINY	19
5.1	Žárupevné slitiny	19
5.2	Vlastnosti žárupevných slitin niklu	20
5.3	Legující prvky ovlivňující vlastnosti superslitin niklu.....	21
5.4	Tuhý roztok γ	24
5.5	Fáze γ' a její přínos pro zpevnění superslitin	24
6.	VYUŽITÍ NIKLOVÝCH SUPERSLITIN NA VENTILY MOTORŮ.....	25
7.	SUPERSLITINA INCONEL 713 LC A JEJÍ VYUŽITÍ.....	26
7.1	Využití u lopatek turbodmychadel	28
7.2	Technologie přesného lití.....	28
8.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	30
8.1	Příprava metalografického výbrusu a popis jednotlivých kroků:.....	30
8.2	Materiál a experimentální technika	30
8.3	Popis a rozbor výsledků.....	31
9.	ZÁVĚR	35
10.	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	36
11.	SEZNAM OBRÁZKŮ	37
12.	SEZNAM TABULEK	38

1. ÚVOD

Superslitiny na bázi niklu mají více než padesátiletou historii. Poprvé byl tento výraz použit v průběhu druhé světové války. Bylo potřeba popsat kategorii slitin, které měly výborné provozní vlastnosti za vysokých teplot. Přesněji pojem superslitina označuje takové materiály, které jsou odolné vůči vysokým teplotám a korozi, dále jsou vysoce pevné. Též může takovýto materiál využít tak, aby splňoval více specifických funkcí.

Tyto superslitiny jsou vhodné pro použití pro turbokompresory, letecké turbíny, stacionární plynové turbíny a raketové motory. Přesněji v horkých částech těchto komponentů, kde si zachovávají své fyzikální i chemické vlastnosti. Jsou zvláště používány pro výrobu oběžných kol malých spalovacích turbín pro pomocné energetické jednotky v leteckém průmyslu.

U těchto superslitin se stalo velice důležité zvyšovat jejich maximální užitnou teplotu. Legující prvky, jako W, Ta, Mo, Re jsou jedním z možností, jak maximální užitnou teplotu lze zvýšit. Dále zde lze zařadit zpracování pomocí modernějších technologií, jež mají za následek, že slitina je čistější. Dnešní slitiny mají pracovní teplotu dosahující 1000-1100°C, které obsahují ještě tzv. žárovečnou vrstvu.

Superslitina Inconel 713LC je pro svůj poměr cena/výkon široce používaným materiálem, též pro své dobré únavové vlastnosti.

V teoretické části rozebereme procesy degradace materiálů za vysokých teplot. Zahrnuta bude též odolnost zejména vůči creepu. Dále se budu věnovat jednotlivé charakteristice niklových superslitin.

Experimentální část bude obsahovat strukturně fázový rozbor výše uvedené slitiny Inconel 713LC z hlediska minoritních fází v základní fázi.

2. CHARAKTERISTIKA NIKLOVÝCH SUPERSLITIN

Chemická značka: Ni, latinsky Niccolum)

Charakteristická skupina: Přechodný kov

Relativní atomová hmotnost: 58,6934

Skupenství: Pevné

Krystalová struktura: Krychlová, plošně centrovaná

Hustota: 8,908 kg/dm³

Tvrдость: 4 (Podle Mohsovy stupnice tvrdosti)

Teplota tání: 1455 °C (1728 K)

Teplota Varu: 2913 °C (3186 K)



obr. 1: Nikl [7]

2.1 Obecná charakteristika niklu

Z historického hlediska se výrobky z niklu objevili před 2000 lety v Číně. Roku 1751 byl tento prvek objeven při pokusech o izolaci mědi z rudy německým chemikem baronem baronem Axelem Frederikem Cronstedtem. Tento prvek je v přírodě hojně zastoupen.

Je to feromagnetický prvek stříbrno-bílé barvy. Výborně se leští, je velmi tažný a kujný. Hodí se pro válcování plechů a nebo vytahování drátů. Pro tento účel je využívání asi 15 % procent z produkce niklu. Dále se využívá jako přísada do slitin ocelí a nebo pro slitiny, kde je základem nikl. Jeho využití můžeme nalézt také v chemickém průmyslu, kde je vyžadovaná určitá specifická korozní odolnost. Používá se i pro výrobu galvanických článků.

V přírodě se vyskytuje velice hojně, avšak nemůžeme ho nalézt v čisté formě. Nalezneme ho např. ve směsích s železem jako je laterit a garnierit [7].

Mechanické vlastnosti niklu

Komerčně čistý nikl dosahuje má mez kluzu na hodnotě 148 MPa a mez pevnosti v tahu na hodnotě 462 MPa. Yongův modul pružnosti je velice blízký, jako u oceli, a má hodnotu 204 GPa.

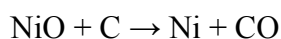
Výskyt niklu

Předpokládá se, že nikl se vyskytuje hluboko pod zemí, někde kolem jejího středu. Vyskytuje se v dopadajících meteoritech.

Největším nalezištěm niklu je kanadské Sudbury. Odtud je též 1/4 produkce niklu na světě. Má se za to, že takto velké naleziště je způsobeno právě velkým meteorickým zásahem do země v dávných geologických dobách.

Výroba niklu

Získávání a výroba niklu je velice složitý proces. Je závislý na rudě, z které ho získáváme. Mezi poslední fáze patří získání Oxidu Nikelnatého, který dále musíme zredukovat. Nejčastěji pomocí koksu.



Výsledný kov se dále pročišťuje pomocí elektrolýzy. Kdy získáváme čistý, rafinovaný nikl a znečištěný, surový nikl.

Rozdělení slitin niklu

Slitiny, kde je obsaženo více než 50% niklu patří do skupiny niklových slitin. Obecně platí, že slitiny niklu jsou tvrdší, pevnější a houževnatější než ostatní slitiny neželezných kovů.

Podle použití je můžeme rozdělit do třech kategorií:

- Konstrukční slitiny
- Slitiny se zvláštními fyzikálními vlastnostmi
- Žáropevné slitiny

2.2 Konstrukční slitiny

Ni – Al – Při použití příměsí hliníku v množství 4,5% můžeme dosáhnout u precipitačního vytvrzení až k 1350 MPa. Této slitiny se využívá u pružinových materiálů, tažených a vytvrzované dráty, k výrobě pump, oběžných kol a hřídelí.

Ni - Mn – Mangan v této slitině zvyšuje korozivzdornost za vyšších teplot v prostředí, kde se nachází síra a její sloučeniny. Používá se např. v kontaktech zapalovacích svíček

Ni – Co – Při použití kobaltu v množství 4,5% ve slitině dochází ke zvýšení magnetických vlastností např. permeability. Využití nalezneme v ultrazvukových zařízeních a elektronice.

Ni – Be – Slitina obsahuje maximálně 1% beryllia. Slitinu s berylliem lze precipitačně vytvrzovat a na 1800 MPa. Uplatní se zejména při výrobě forem pro vstřikování plastů, dále pro výrobu pružin a v leteckém průmyslu při výrobě palivových čerpadel.

Ni – Cu – Slitiny nazvané Monel nebo Nicorros. Obsahují 67% niklu, 30% mědi a stopové prvky křemíku, hliníku, železa a manganu. Tyto slitiny se vyznačují dobrou korozivzdorností, dobrou houževnatostí a pevností a tepelnou vodivostí. Uplatňují se ve farmaceutickém a chemickém průmyslu, energetice, potravinářství a námořních aplikacích.

Ni – Si a Ni – Mo – Jsou to slévárenské slitiny, které obsahují buď křemík nebo molybden v množství od 10% do 35%. Mají dobrou odolnost vůči horké i studené kyselině sírové.

2.3 Slitiny se zvláštními fyzikálními vlastnostmi

Odporové slitiny – slitiny Ni – Cr použití je např. v topných odporech, kde teploty můžou dosahovat až 1150°C. Známé jsou též jako nichrom, chromnikl, pyrochrom. Chrom je zde uplatněn do 20% a zvyšuje žárupevnost. Dalším prvkem ovlivňující vlastnosti slitiny je železo, které zvýší odolnost vůči působení síry. Avšak negativním dopadem je snížení teploty použití a to na maximálně 1000 °C.

Termočláňkové slitiny – jak vyplývá z názvu, používají se pro termočláňky s teplotním rozsahem od 300-1000 °C.

Patří zde:

- CHROMEL Ni – Cr – chrom do 10%
- KONSTANTAN Ni – Cu – Mn – 58% mědi a 2% manganu
- KOPEL Ni – Cu – Mn – 56,5% mědi a 0,5% manganu
- ALUMEL – Ni – Al – Mn – Si – 2,2% hliníku, 2% manganu, 1,5% křemíku

Magneticky měkké slitiny – mají vysokou a stálou permeabilitu. Tyto slitiny obsahují velké hmotnostní procento železa, až 64%. Mezi další prvky legující tuto slitinu je molybden, měď, chrom a křemík. Využití najdeme především v jádrech transformátorů měřících zařízeních.

Slitiny s malou tepelnou roztažností – slitiny s Fe – Ni mají shodný koeficient tepelné roztažnosti, jako mnoho druhů skel a porcelánu.

3. PROCESY DEGRADACE MATERIÁLŮ ZA VYSOKÝCH TEPLOT

Pojmem žírupevnost můžeme rozumět jako odolnost materiálu vůči vnějšímu namáhání za zvýšených teplot, kdy nedochází k trvalé deformaci nebo k lomu. Žírupevné materiály jsou tedy vystavovány různými časově proměnlivými zatíženími. Mezi ně patří zatížení neustálená, cyklická a v některých případech i statická.

Na vysokoteplotní pevnost a životnost mají vliv tyto činitele:

- TEPLOTA
- NAPĚTÍ
- ČAS
- AGRESIVITA PROSTŘEDÍ
- KONSTRUKČNÍ FAKTORY A VOLBA MATERIÁLU
- TECHNOLOGICKÁ ŘEŠENÍ A KVALITA PROVEDENÍ

Vzájemný vliv prvních čtyřech činitelů má za následek různé procesy poškozování materiálu. Mezi ně patří:

- TEČENÍ
- ÚNAVA
- KOROZE
- EROZE

3.1 Tečení materiálu (CREEP)

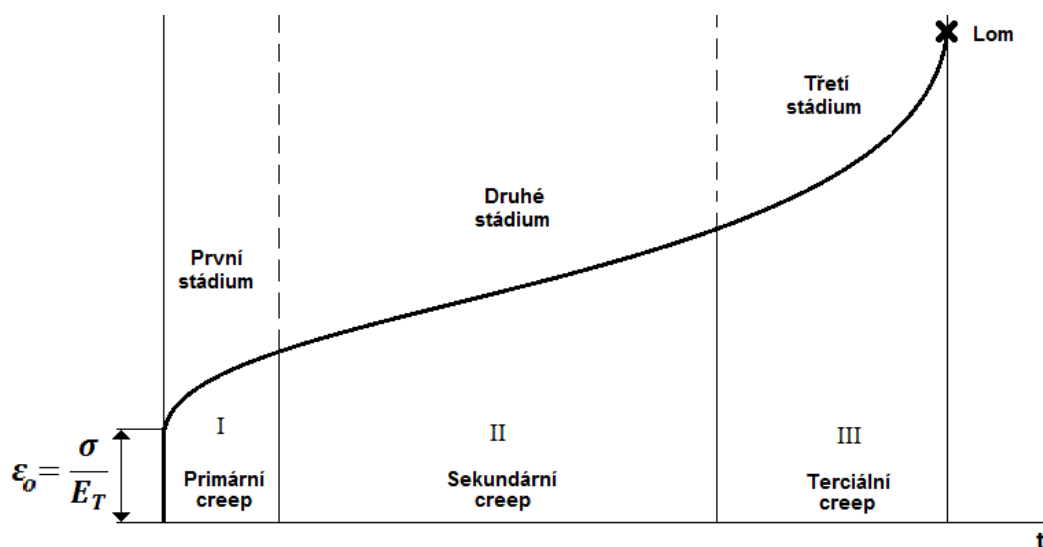
U tahové zkoušky při pokojové teplotě, která se pohybuje kolem 20°C, jsou mechanické vlastnosti materiálu závislé pouze velikosti zatěžující síly. Zanedbatelný vliv má též čas. Pokud tedy neměníme sílu, nemění se prodloužení. Zvýšíme-li teplotu, asi nad poloviční hodnotu tavení, jsou pak změny délky při dlouhotrvajícím konstantním zatížení větší. Tuto změnu tvaru, nebo délky při tomto zatížení nazýváme jako tečení, nebo též creep.

Tečení materiálu lze definovat jako pomalou plastickou deformaci materiálu, která je závislá na teplotě a času. To znamená, že čím vyšší teplota a větší zatížení, tím je větší rychlost tečení vyšší a čas do lomu se zkracuje.

Creepové charakteristiky jsou závislé na teplotě tavení, modulu pružnosti a velikosti zrna. Vyšší modul pružnosti ovlivňuje počáteční deformaci, která je díky tomu nižší. Samotný modul pružnosti je tedy tím vyšší, čím vyšší je teplota tavení. Velikost zrn zase ovlivňuje odolnost vůči creepu. Tedy čím větší zrna, tím větší odolnost [3].

3.2 Křivka tečení

Křivka tečení je graf namáhání v čase a ukazuje nám nárůst deformace.



obr. 2: Křivka tečení

Na křivce tečení lze vidět tři časové oblasti:

- První stádium – Neustálené
- Druhé stádium – Ustálené
- Třetí stádium – Zrychlené

První stádium

Neustálené, nebo též logaritmické tečení. V tomto stádiu dochází ke zmenšení sklonu creepové křivky s rostoucím časem. Rychlost tečení pro daný materiál klesá na určitou minimální hodnotu. Pohyb a nárůst dislokací je rozhodujícím bodem v této fázi. V materiálu zde dochází k deformačnímu zpevnění.

Druhé stádium

V tomto stádiu je rychlost tečení ustálené, tedy konstantní. Závislost deformace a času je lineární. Toto stádium, přesněji jeho délku ovlivňují dva faktory, je to velikost zatížení a teploty působící na materiál. Tedy, čím vyšší jsou tyto faktory, tím kratší je křivka druhého stádia. Je zde vytvořena rovnováha mezi procesy zpevnění a zotavení.

Třetí stádium

V tomto stádiu dochází k monotónnímu nárůstu rychlosti tečení až do konečného lomu. Většinou se jedná o křehký interkrystalický lom. Můžeme zde sledovat rozvoj mikrotrhlin a pórů.

Matematický popis

Matematický popis křivky tečení je velice těžce popsitelný. Všechny tyto popisy jsou spíše zjednodušené. Jeden z nejužitečnějších popisů je, že doba lomu je nepřímo úměrná k rychlosti tečení. Jediným a též základním způsobem, jak zcela popsat základní vlastnosti materiálu je právě celá křivka tečení [1].

3.3 Odolnost vůči creepu

Každý materiál, či slitina mají své mechanické vlastnosti. Ty jsou ovlivněny chemickým složením, stavem povrchu a strukturou. Každý z nich ovlivňuje jednotlivé aspekty materiálu. Odolnost proti tečení je forma pevnosti. Mezi faktory, které ovlivňují zpevnění řadíme:

- Zpevnění tuhého roztoku
- Energii vrstvené chyby
- Velikost zrna
- Precipitační a disperzní zpevnění
- Dislokační zpevnění
- Zpevnění s využitím anizotropie

Zpevnění tuhého roztoku

Zpevnění tuhého roztoku dosahujeme pomocí:

- Zvýšení teploty tavení a teplotního rozmezí procesů zotavení a rekrystalizace
- Růst stability
- Snížení součinitele samodifúze
- Nárůst vazebné energie atomů v mřížce
- Snížení energie vrstvené chyby
- Chemické blokování dislokací
- Vytváření atmosfér rozpuštěných atomů

Pomocí určitých legujících prvků dosahujeme lepší pevnosti materiálu. Větší zpevnění způsobují prvky, které vytváří intersticiální roztok.

Energie vrstvené chyby

Patří mezi základní charakteristiky tuhých roztoků a kovů. Má vliv na dislokace a disociace, přitahování a odpuzování, na vytváření prostorových konfigurací a rozšířených dislokací. Energie vrstvené chyby je tedy hodnota, která nám aktivuje působení mezi dislokacemi. Má vliv na základní procesy plastické deformace.

Velikost zrna

Při pokojové teplotě mají jednozrnné materiály vysokou mez kluzu a značnou pevnost. Při vyšších teplotách je však závislost velikosti zrn daleko důležitější. Protože čím jsou zrna větší, tím mají větší pevnost při tečení.

Precipitační a disperzní zpevnění

Precipitační zpevnění nebo disperzní zpevňováním je proces, kdy zpevňujeme materiál pomocí částic druhé fáze. Precipitační zpevnění je tepelný proces vložení druhé fáze. Disperzní zpevnění je mechanický proces, kdy vkládáme druhou fázi pomocí práškové formy. Díky těmto procesům pak dosahujeme toho, že omezíme kluz dislokací, pohyb hranic zrn a zakotvíme dislokační síť.

Dislokační zpevnění

Na základě deformování materiálu za studena můžeme značně zvýšit odolnost kovů proti tečení. Toto zpevnění je však účinné pro teploty, které jsou pod hodnotu $0,4 T_m$. Při vyšších teplotách není efekt zpevnění tak velký.

Zpevnění s využitím anizotropie

Anizotropie struktury je charakteristickou vlastností krystalů. Závisí na rozmístěních atomech v krystalické mřížce. To znamená, že v některých krystalografických směrech jsou atomy obsazeny hustěji a v některých méně. Ovlivňuje to tedy rozdílné mechanické vlastnosti v závislosti na krystalografickém směru [1].

Usměrňovat anizotropii v náš prospěch můžeme:

- Usměrněním zrn
- Usměrněním krystalizace
- Usměrněním rozložením fází
- Práškovou metalurgii a izostatickým lisováním za tepla (HIP)

4. ŽÁRUPEVNÉ SLITINY

Tyto slitiny bývají často nazývány jako superslitiny. Jsou založeny na Ni – Cr bázi, kdy jsou dále legovány přísadami jako je kobalt, wolfram, železo, vanad, niob, tantal, bor, zirkonium, titan, hliník, hořčík a mnoho dalších. Tyto superslitiny se nevyznačují vysokou mírou modulu pružnosti, nebo nízkými difuzními charakteristikami, přesto se využívají pro součástky, které jsou dlouhodobě namáhány při vysokých teplotách [8].

Ni – Cr a **Ni – Cr – Fe** slitiny s těmito bázemi jsou označovány jako žáruvzdorné. Tyto slitiny mají velmi malý obsah různých příměsových prvků např. uhlíku. Mohli by nepříznivě ovlivnit vlastnosti slitin vytvořením nežádoucích fází.

Ni – Cr k této bázi jsou přidány přísadové prvky jako je hliník a titan. Tyto dva prvky vytvářejí vytvrzující fázi. Pokud se vyskytují oba tyto příměsové prvky ve slitině, mluvíme o takzvané γ' fázi. Tyto slitiny jsou velice odolné vůči mechanickému zatížení za vysokých teplot. Bývají též označovány jako žárupevné slitiny. Těmto slitinám se budu věnovat i dále [3].

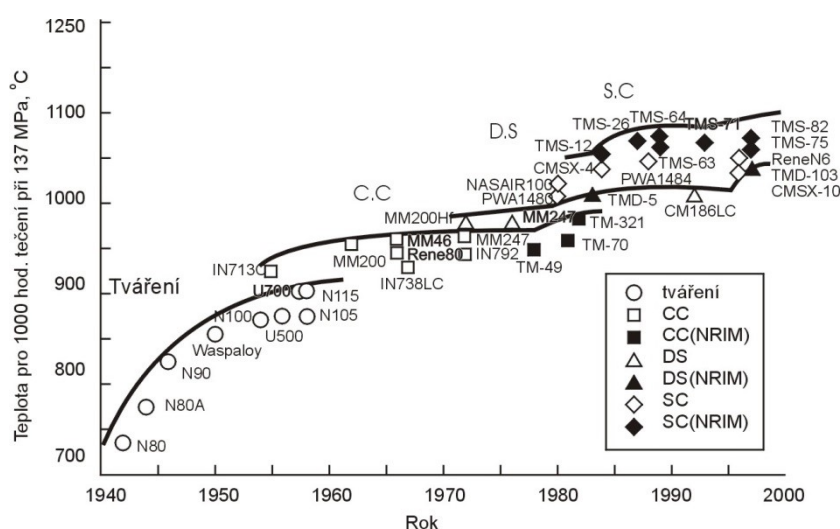
4.1 Žárupevné slitiny

Historie

Z hlediska historie, to byl právě letecký a raketový průmysl, který se výrazně podílel na rozvoji těchto slitin, jelikož otázka nákladů na vývoj a výrobu byla až na druhém místě. Avšak takovéto materiály s velkou korozivzdorností, mechanické odolnosti při vysokých teplotách bylo potřeba i v jiných odvětvích. Můžeme jmenovat například energetický průmysl, chemický ale i ropný.

Jako jednu z prvních „superslitin“ můžeme považovat slitinu Monel K 500. Mezi další patřili slitiny s označením Nimonic. Tyto slitiny už nabízeli daleko lepší vlastnosti z důvodů vylepšení technologie výroby. Slitiny do této doby byly většinou taveny v otevřených pecích, což mělo za následek, daleko menší množství γ' fáze.

Postupem času, kdy se zjistila důležitost γ' fáze, zdokonalením výrobního procesu, usměrněním chemického složení slitin vzniklo mnoho druhů superslitin, které můžeme aplikovat dle požadavků na daný materiál [1].



obr. 3: Historie vývoje žárupevných slitin [1]

4.2 Vlastnosti žárupevných slitin niklu

Jak už bylo zmíněno výše, superslitiny niklu nemají zvlášť vysokou úroveň modulu pružnosti, ani nízkou difúzní charakteristiku. Přesto, pokud chceme materiál odolný vůči creepu, patří tyto superslitiny k těm, které jsou k těmto úlohám přednostně využívány.

Tyto vlastnosti superslitin zajišťuje hlavně vysoká strukturní stabilita a taky ochranný povlak Cr_2O_3 vytvořen právě působením chromu, který omezuje difúzi kovu ze slitiny a difúzi kyslíku a síry dovnitř objemu superslitiny.

O vysokou žárupevnost se pak starají prvky Ti a Al, které tvoří takzvanou γ' fázi. Negativním dopadem těchto příměsí při velkém poměru je, že je musíme zpracovávat pouze přesným litím.

Tepelné zpracování niklových superslitin

Homogenizační a rekrytalizační žíhání, žíhání za sníženého pnutí, nebo vytvrzování jsou jedny z možností zpracování superslitin.

Pro optimální vyloučení zpevňující fáze v objemu slitiny se používá kombinace zpracování skládajícího se z rozpouštěcího žíhání, následného ochlazení a dodatečného umělého stárnutí.

Rozpouštěcího žíhání je dosahováno pomocí ohřátí materiálu na teplotu v rozmezí 1080 °C až 1220 °C po dobu od 2 h až 12 h. Tento proces se provádí ve vakuových pecích. Následně se superslitina ochlazuje na vzduchu. Chlazení vodou není žádoucí, jelikož hlavně u vysokolegovaných slitin může docházet k trhlinám z důvodu prudkého ochlazení.

Proces umělého stárnutí je dosahován tím, že ohřejeme superslitinu na teplotu, která je vyšší nebo rovna, než teplota funkce součásti. Výsledkem tohoto procesu je vylučování γ' fáze [4].

4.3 Legující prvky ovlivňující vlastnosti superslitin niklu

Legující prvky zásadně mění mechanické vlastnosti superslitin, a tak využíváním těchto prvků v různém poměru a složení, můžeme vytvářet velké množství superslitin vhodné pro různou aplikaci.

NIKL (Ni) – je to základní matrice slitiny.

ŽELEZO (Fe) – tento prvek může z malé části nahradit chybějící nikl. Mezi nevýhody aplikace tohoto prvku patří snížení žáruvzdornosti. Mezi výhody při použití tohoto prvku můžeme zmínit nižší cenu takovéto slitiny.

KOBALT (Co) – tohoto prvku se využívá především pro zvýšení žárupevnosti a snížení vrstvené chyby. Jako další z výhod použití tohoto prvku je, že má kladný vliv na technologické vlastnosti slitiny. Můžeme zmínit třeba zlepšenou tvářitelnost i za velkého obsahu γ' fáze.

CHROM (Cr) – Tento prvek zvyšuje odolnosti proti creepu. Dále zlepšuje plastické vlastnosti slitiny. Slitině také zajistí dobrou odolnosti vůči oxidaci.

BOR (B) – Tento prvek má vliv na morfologii hranic zrn, což má za následek zvýšení pevnosti při creepu.

HAFNIUM (Hf) a ZIRKONIUM (Zr) – stejné ovlivňující vlastnosti jako výše zmíněný bor.

CER (Ce) – Tohoto prvku je využíváno pro zlepšení odolnosti proti vysoko-teplotní oxidaci.

MOLYBDEN (Mo) a WOLFRAM (W) – Tyto prvky kladně ovlivňují hlavně zpevnění matrice γ .

HLINÍK (Al) – Má vliv na zvýšení žáruvzdornosti a vytváření γ' fáze.

TITAN (Ti), NIOB (Nb), TANTAL (Ta), VANAD (V) – tyto prvky mohou být použity jako náhrada za hliník [1].

Další prvky vyskytující se v této slitině mohou mít v určitém množství koncentrace také pozitivní vliv. Jinak se však jedná o nežádoucí metalurgické přísady, které se při výrobě většinou odstraňují, nebo alespoň se potlačuje jejich účinek. Mezi takovéto prvky patří oxid, dusík a síra. U dusíku docházelo k pokusům o zpevnění γ fáze. Tyto pokusy byla však zatím neúspěšné. Dusík tak momentálně působí jako výrazný škodlivý prvek, který vytváří různé defekty u odlitků a jeho koncentrace by neměla přesáhnout 20 – 40 ppm [2].

4.4 Vývoj slitin niklu

V tab. I, tab. II a tab. III můžeme vidět postupný vývoj monokrystalických slitin. Jsou rozděleny do tzv. generací. Tyto generace odpovídají pokrokům ve vědě a technologii, pro vytváření těchto slitin, které měli vysokou pevnost proti tečení a vysokou odolnost proti tepelné a nízkocyklové únavě [1].

Postupným zdokonalováním chemického složení, se jednotlivé generace slitin zlepšovaly. Jako příklad lze využít slitiny III. generace (tab.III), kde je zvýšen obsah Re až do 6%. Rhenium je prvek s vysokým bodem tání. Také se experimentuje se přidáním iridia, které omezuje vylučování nežádoucích TPC fází, jež mají nepříznivý vliv na degradaci materiálu [1].

Je třeba říci, že neexistuje tak univerzální slitina, aby splnila veškeré specifické požadavky a zároveň zůstaly nízké náklady na výrobu [1].

Slitina (%hm.)	<u>Cr</u>	Co	<u>Mo</u>	W	Al	Ti	Ta	<u>Hf</u>	Jiné	V _v γ'	ρ Mg/m ³
NASAIR100	9	-	1	10,5	5,7	1,2	3,3			69	8,54
CMSX-2	8	5	0.6	8	5.6	1	6			64	8.56
CMSX-3	8	5	0.6	8	5.6	1	6	0,1			8.56
CMSX-6	9,8	5	3	-	4,8	4,7	2	0.1		70	7,98
PWA 1480	10	5	-	4	5	1.5	12			80	8.70
TMS-1	5,5	7,5	-	16,6	5,2	-	5,1			65	
TMS 63	6.9	-	7.5	-	5.8	-	8.4				8.48
AM3	8	5,5	2,25	5	6	2	3,5				8,25
SRR 99	9	5	-	9.5	5.5	1.8	1.8		<u>Nb</u> 0,7		8.50
Rene N4	9	8	2	6	3.7	4.2	4		<u>Nb</u> 0,5		8.56
RR2000	10	15	3	-	5,5	4	-		V 1,0		7,80
<u>S.C.</u> 16	16	-	3	-	3.5	3.5	3.5			45	8.21

tab. I: Nominální chemické složení (%hm.) monokrystalických slitin I. generace[1]

Slitina	<u>Cr</u>	Co	<u>Mo</u>	W	Al	Ti	Ta	<u>Hf</u>	Re		ρ Mg/m ³
CMSX-4	6.5	9	0.6	6	5.6	1	6.5	0,1	3		8.70
PWA 1484	5	10	2	6	5.6	-	9	0,1	3		8.95
Rene N5	7	8	2	5	6,2	-	7	0,2	3		8.56
S.C. 180	5	10	2	5	5,2	1	8,5	0,1	3		8,84
SMP 14	4,8	8,1	1	7,6	5,4	-	7,2	-	3,9	<u>Nb</u> 1,4	9,02

tab. II: Nominální chemické složení (%hm.) monokrystalických slitin II. generace[1]

Slitina	<u>Cr</u>	Co	<u>Mo</u>	W	Al	Ti	Ta	<u>Hf</u>	Re	Jiné	ρ Mg/m ³
CMSX-10	2	3	0.4	5	5.7	0,2	8	0,03	6	<u>Nb</u> 0,1	9,05
CMSX-10M	2	1,7	0,4	5,4	5,78	0,24	8,2	0,03	6,5	<u>Nb</u> 0,08	9,02
Rene N6	4,2	12,5	1,4	6	5,75	-	7,2	0,15	5,4	C 0,05 B 0,004 Y 0,01	8.97
Alloy 5A	4,5	12,5	-	5,75	6,25	-	7	0,15	6,25	C 0,05 B 0,004 Y 0,01	8,91
TMS – 75	3	12	2	6	6	-	6	0,1	5	-	< 9
TMS – 80	2,9	11	1,9	5,8	5,8	-	5,8	0,1	4,9	<u>Ir</u> 3	-

tab. III: Nominální chemické složení (%hm.) monokrystalických slitin III. generace[1]

5. ZÁKLADNÍ STRUKTURNÍ FÁZE

Nynější žárupevné slitiny, které jsou využívány, jsou nejčastěji vícesložkové a mnohofázové. Jejich mikrostruktura obsahuje stabilní i nestabilní fáze [1].

5.1 Tuhý roztok γ

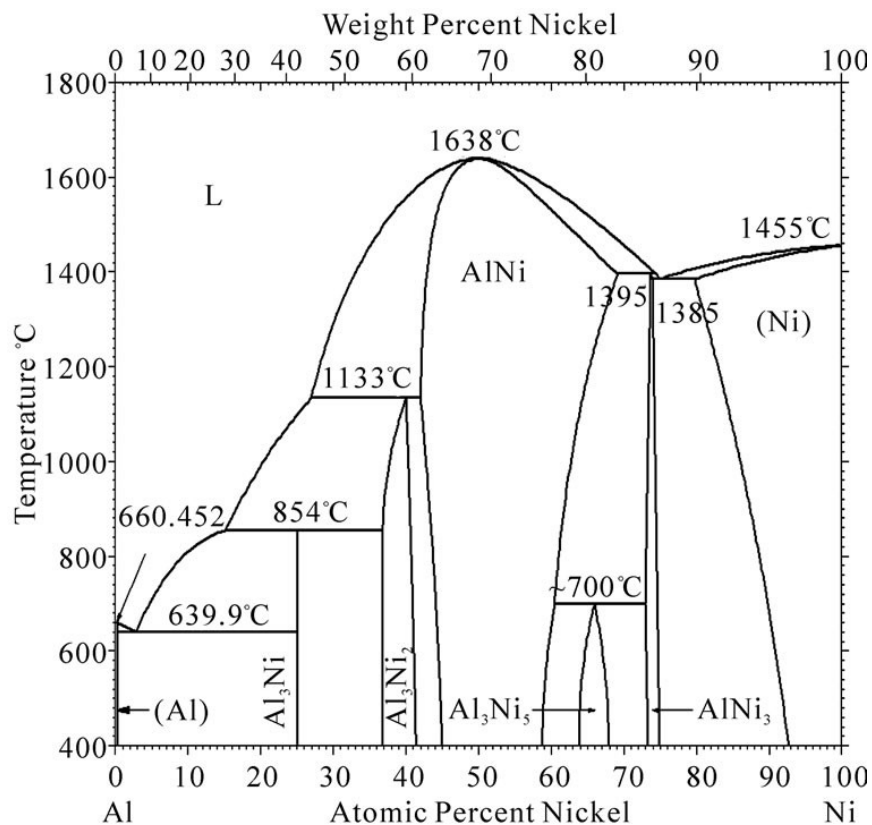
Nikl, jako takový nemá vysokou hodnotu modulu pružnosti za zvýšené teploty a má vysokou hodnotu součinitele samodifúze, která snižuje žárupevnost. Naproti tomu tuhý roztok na základě niklu se vyšší žárupevností vyznačuje. Důležitá vlastnost je vytváření oxidické ochranné vrstvy na povrchu slitiny, které zabraňuje pronikání kovů do povrchové vrstvy a difuzí škodlivých příměsí kyslíku, dusíku a síry dovnitř slitiny a schopnosti niklu tvořit tuhé roztoky. [1].

Niklové superslitiny mají základní kovovou matici, kterou tvoří tuhý roztok γ s kubickou plošně centrovanou mřížkou. Ta je substitučně zpevněná legujícími prvky. Každý z legujících prvků má rozdílné atomové poloměry, které mohou matici výrazně zpevňovat a také různý počet elektronových vakancí. Označení N_v nám označuje počet vakancí, který má stupnici 1 až 7,6. Tyto parametry prvků ovlivňují metalurgické charakteristiky základní matrice pomocí snížení energie vrstvené chyby.[10].

5.2 Fáze γ' a její přínos pro zpevnění superslitin

Základ žárupevných slitin niklu je v binárním rovnovážném systému Ni-Al (obr. 4). Pokud se nachází ve slitině více než 10% hliníku dochází k vylučování fáze γ - Ni_3Al , popřípadě je hliník nahrazen titanem [1].

Fáze γ' patří mezi základní fázi superslitin. Tato fáze má největší dopad na ovlivnění žárupevnosti slitiny a to jak svým chemickým složením, rozmístěním precipitátů tak i morfologií. Výsledkem procesů vylučování z neuspořádaného tuhého roztoku je právě fáze γ' . Chemické složení slitin, zejména obsah prvků hliníku, titanu, niobu a tantalu, ovlivňuje množství vylučované fáze γ' a jejich morfologii.



obr. 4: Rovnovážný diagram Ni – Al [8]

6. VYUŽITÍ NIKLOVÝCH SUPERSLITIN NA VENTILY MOTORŮ

Uplatnění těchto slitiny u ventilů se využívá především u dieslových motorů, které nabízejí velké výkony. V nich totiž dochází k nadměrnému tepelně-mechanickému zatížení. Tyto zatížení jsou navíc velice proměnlivé. Dále se vyskytují v prostředí, které je velice agresivní. Obsahuje sloučeniny síry, vanadu a popelu. Tyto sloučeniny velice ovlivňují vznik koroze a při vysokých teplotách, které se kolem ventilů vyskytují, korozi ještě více rozvíjejí.

Pro ventily dieslových motorů se používají tyto slitiny:

- Nimonic80A
- Nimonic81
- Nimonic91
- InconelX750
- MHW4

Dříve se používali na ventily vysokolegované oceli, ať už martenzitické, nebo austenitické. Problém bylo, že při namáháních, které jsou jmenovány výše docházelo k častým a opakovaným poškození ventilů.

Mezi tyto poškození patřily:

- Nízkocyklové i vysokocyklové únavové poškození.
- Korozní poškození a nebo korozní poškození podpořené únavou materiálu.

Při těchto procesech poškození tedy docházelo až k úplnému přetržení nebo připálení.

Aplikací niklových superslitin se tento problém z velké části, pro jejich odolnost, vyřešil. Zvýšení životnosti a odolnosti byly jedny z hlavních devíz. Avšak velkým problémem niklových superslitin a jejich následné využití je hlavně v ceně. Dále je to pak také technologická náročnost výroby a aplikace na ventily.

Aby mohly být vytvořeny podmínky pro výrobu ventilů ze superslitin niklu, je třeba mít dokonale zvládnutý proces tavení a vakuové rafinace, vstupního tváření a dodržování teploty deformace [1].

7. SUPERSLITINA INCONEL 713 LC A JEJÍ VYUŽITÍ

Slitina INCONEL 713LC je litá polykrystalická superslitina niklu. Tato slitina vychází ze slitiny INCONEL 713C. Avšak je modifikována, aby se posunuly teploty solidu i likvidy směrem vzhůru. Dále je pak modifikovaná za účelem zlepšení vlastností slitiny. Především zde lze zmínit zvýšení plasticity. Tyto vlastnosti jsme získali nízkouhlíkovou modifikací, tedy snížení obsahu uhlíku.

Složení superslitiny INCONEL 713LC:

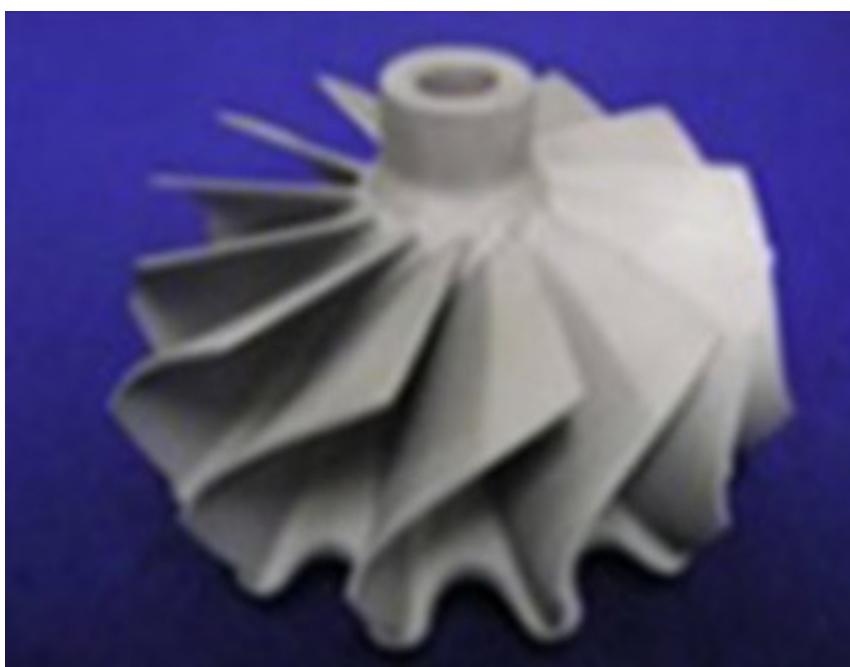
- Uhlík – 0,03 až 0,07
- Mangan – maximálně 0,25
- Křemík – maximálně 0,30
- Chrom – 11,0 až 13,0
- Titan – 0,40 až 1,00
- Hliník- 5,50 až 6,50
- Železo – maximálně 0,50
- Bór – 0,005 až 0,015
- Zirkonium – 0,050 až 0,150
- Niob a Tantal – 1,50 až 2,50
- Molybden – 3,80 - 5,20
- Měď – maximálně 0,50
- Kobalt – maximálně 1,0
- Síra – maximálně 0,015
- Zbytek slitiny obsahuje Nikl

Využití této slitiny nacházíme hlavně u lopatek turbodmychadel a u lopatek stacionárních plynových turbín.

7.1 Využití u lopatek turbodmychadel

Lopatky turbodmychadel jsou teplotně velice namáhané součástky. Dochází zde jednak k velkým teplotním výkyvům, tak i k dlouhodobému vysokoteplotnímu namáhání. Turbodmychadlo se může dle potřeby roztáčet až na 300 000 ot./min a vyrovnávat se s výfukovými plyny, které mají teplotu až 950°C. Proto se zde využívá slitiny INCONEL 713LC, která je schopna takovýmto podmínkám odolávat.

Výrobou lopatek turbodmychadel se u nás zabývá strojírna Velká Bíteš, a.s. Výroba lopatek turbodmychadel se provádí pomocí přesného lití [11].



obr. 5: Lopatky turbodmychadla [11]

7.2 Technologie přesného lití

Pro výrobu takových to součástek ze slitiny INCONEL 713LC se využívá technologie přesného lití. Tato technologie se vyznačuje tím, že umožňuje vyrobít tvarově a rozměrově rozmanité výrobky, kde velice záleží na přesnosti. Výhoda této technologie spočívá v tom, že výrobky vychází v takovém stavu, že spousty funkčních ploch nemusí být následně obráběny.

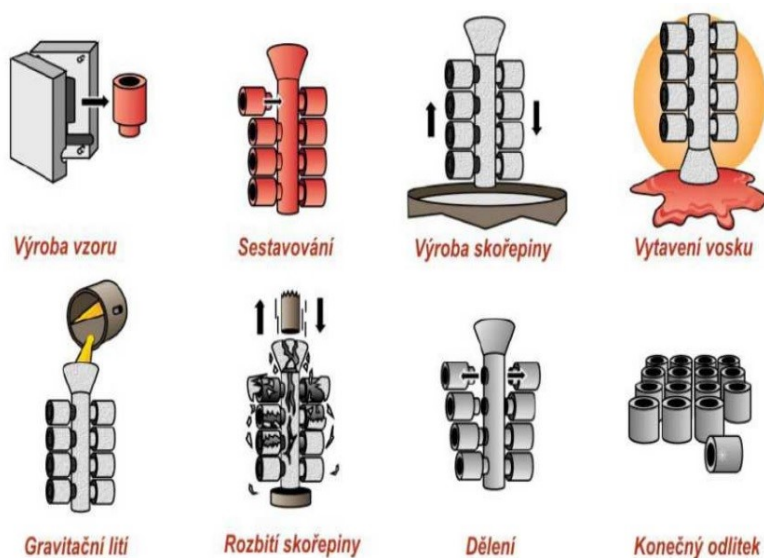
Pro výrobu lopatek turbodmychadel a lopatek stacionárních turbín se využívá metody vystavitelného modelu.

Tato metoda je charakterizována velkou přesností lití. Výrobky vycházející z ní mohou být tak přesné, že nepotřebují už další opracování. To se hodí zvláště u materiálů, které neumožňují další obrábění a nebo jejich následné obrábění velice nákladné.

Princip této metody spočívá ve vyrobení modelu z voskové směsi. Takto vyrobený model se dále napojí do vtokové sestavy nebo též vtokového kůlu.

Následně je nutné vytvořit na voskovém modelu takzvanou „skořepinu“. Je to vrstva tvořená keramickým ostřivem a keramickým základem, který získáme namáčením modelu do keramické břečky. Dle potřeby je na voskový model nanášeno 5 až 15 takovýchto keramických vrstev.

Po vytvoření skořepiny z ní dostaneme teď už přebytečný vosk. Toto se dělá za pomoci přehřáté páry, kdy vosk z formy vyteče. Před odlitím výrobku je třeba pak skořepinu ještě důsledně vysušit, vyžítat, očistit, zaizolovat a zkontrolovat. Po odlití a vytuhnutí odlitku se skořepina rozbije a nám zůstane samotný odlitek [5] [6].



obr. 6: Proces vytavitelného modelu [5]

8. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

8.1 Příprava metalografického výbrusu a popis jednotlivých kroků:

- **Odběr** – z výrobku se odřízne část, u které je nutné, aby při řezání materiál nezahřál a tak se nezměnila vlastnost materiálu.
- **Zalití a zalisování vzorku** – pomocí zafixování výrobku do vhodného materiálu můžeme materiál začít brousit a leštit.
- **Broušení** – k broušení se využívá nejčastěji brusné metalografické papíry. Začíná se na nejhrubších zrnitostech papíru a postupně se přechází k těm jemnějším. Brousíme z toho důvodu, aby jsme zarovnali zkoumaný vzorek.
- **Leštění** – tímto procesem dochází k zarovnání rýh, které vznikají při broušení. Diamantové částice, oxid hlinitý zaltačují rýhy do leštiva. Vzorek je správně vyleštěný, až vypadá, jako zrcadlově lesklý.
- **Leptání** – Abychom mohli mikrostrukturu vidět, co nejlépe, je třeba aby byl povrch vzorku ponořen do leptadla, které jí dostatečně zviditelní. K tomuto účelu jsou využívány kyseliny, zásady a soli.

8.2 Materiál a experimentální technika

V experimentální části byl podroben strukturně fázové analýze vzorek předmětné niklové slitiny INCONEL 713LC. Za tímto účelem byl připraven metalografický výbrus. Metalografické sledování bylo provedeno na světelném mikroskopu Olympus GX51 a fázový rozbor pomocí řádkovacího elektronového mikroskopu JEOL JSM 6490LV.

Chemické složení bylo provedeno metodou fluorescenční rentgenovou spektrometrií (XFRS). Principem metody je interakce rentgenového záření, které emituje rentgenka, se vzorkem. Při této interakci dochází k vyrazení elektronu z vnitřních slupek zkoumané látky. Následně dojde k přesunu elektronu z vyšších energetických hladin a vyzáření sekundárního rentgenového záření, které je charakteristické pro všechny prvky. Toto záření je poté detekováno na detektoru [12].

8.3 Popis a rozbor výsledků

Zjištěné chemické složení odpovídá chemickému složení slitiny Inconel 713LC. Výsledky těchto měření můžeme nalézt v tabulce 7.1.

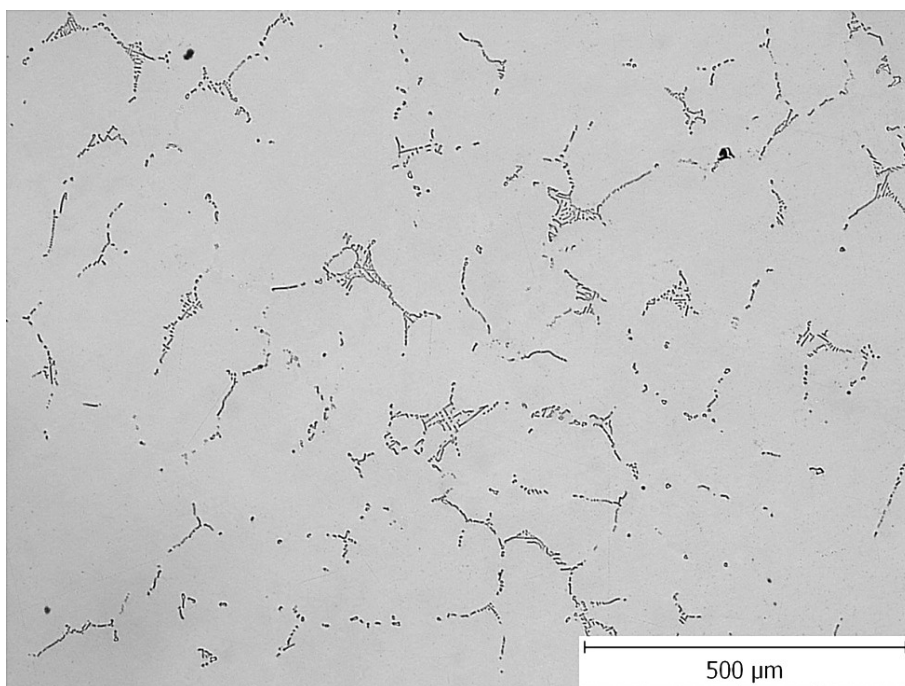
Číslo vzorku:	1	2	3	4	5	Průměr měření
Analyt	Výsledek	Výsledek	Výsledek	Výsledek	Výsledek	
Mg	0,27	0,25	0,33	0,31	0,27	0,286
Al	5,91	5,91	5,94	5,91	5,69	5,872
Ti	0,65	0,62	0,64	0,65	0,64	0,64
Cr	11,6	12,0	11,3	11,3	11,3	11,5
Mn	0,05	0,06	0,05	0,05	0,05	0,052
Fe	0,07	0,15	0,05	0,10	0,09	0,092
Co	0,01	0,14	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,036
Ni	73,8	73,7	74,0	74,0	74,3	73,96
Cu	0,10	0,10	0,10	0,11	0,10	0,102
Zr	0,10	0,07	0,10	0,10	0,10	0,094
Nb+Ta	2,50	2,11	2,48	2,52	2,42	2,406
Mo	3,79	3,67	3,96	3,95	3,90	3,854

tab. IV: Výsledky měření chemického složení (%hm)

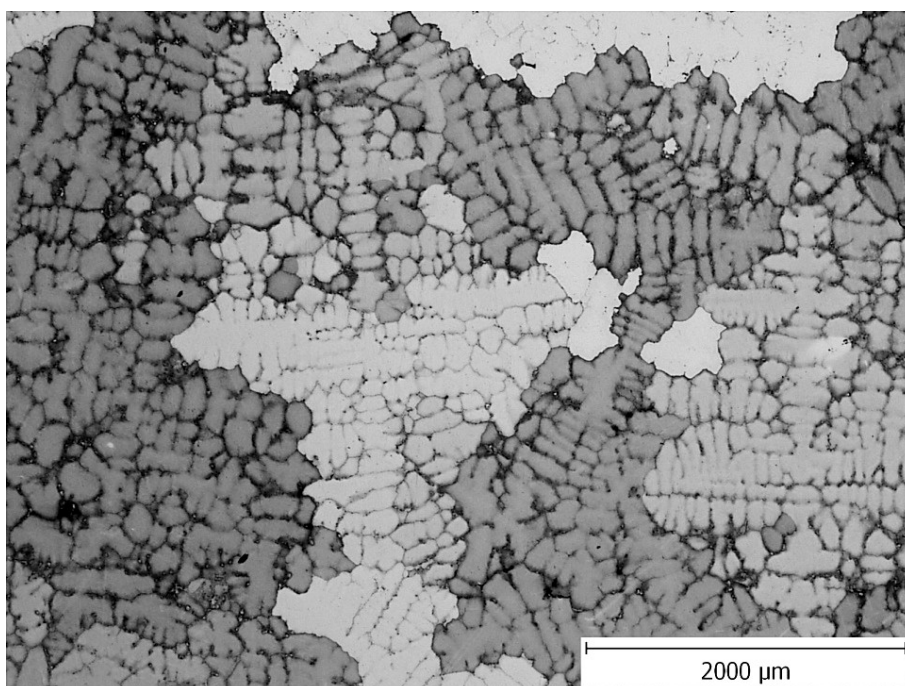
Elektrono-mikroskopickým rozбором bylo zjištěno, že procesy odmišení v průběhu solidifikace vedly ve výsledné mikrostruktuře ke vzniku výrazných chemických heterogenit. V mezidendritických prostorách byly vyloučeny velmi četné útvary eutektika, tvořené především hrubými částicemi fáze γ' . Byla zaznamenána přítomnost sulfidů ZrS.

Souhrnné označení analyzovaných fází:

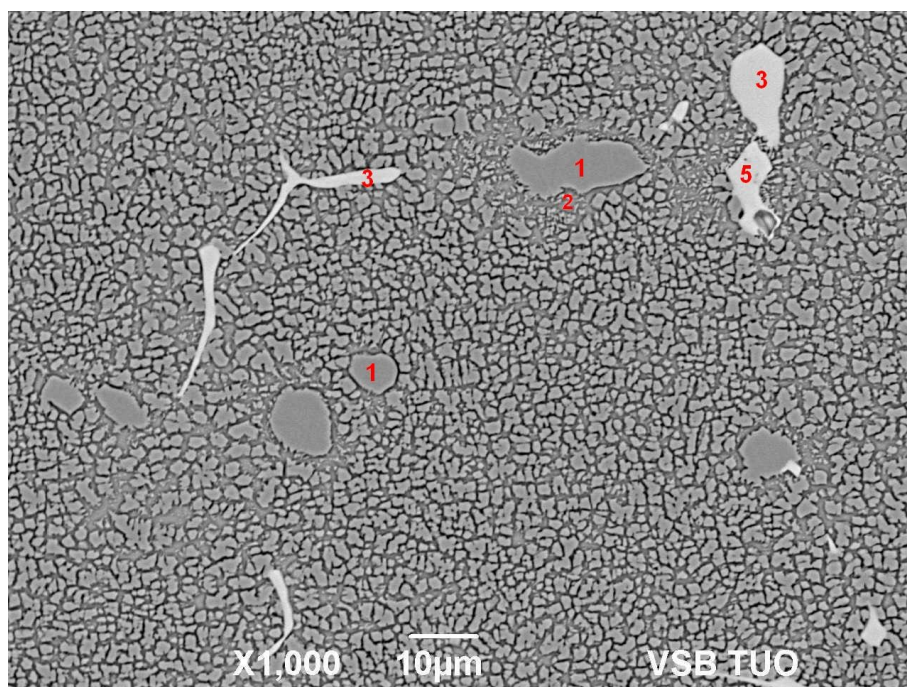
- 1 – fáze γ'
- 2 – matrice v okolí eutektik (včetně vyloučených drobounek částic γ')
- 3 – primární karbidy typu MC (Nb,Ti)
- 4 – fáze bohatá Mo a Cr (boridy, příp. $M_{23}C_6$)
- 5 – fáze bohatá Zr, Nb (+ Ti - pravděpodobně modifikované MC karbidy)
- 6 - fáze bohatá Ni, Zr – je zde identifikován Si, tvoří „pseudoeutektika



obr. 7: Neleptaný stav, fáze na hranicích dendritů, vznikající eutektika

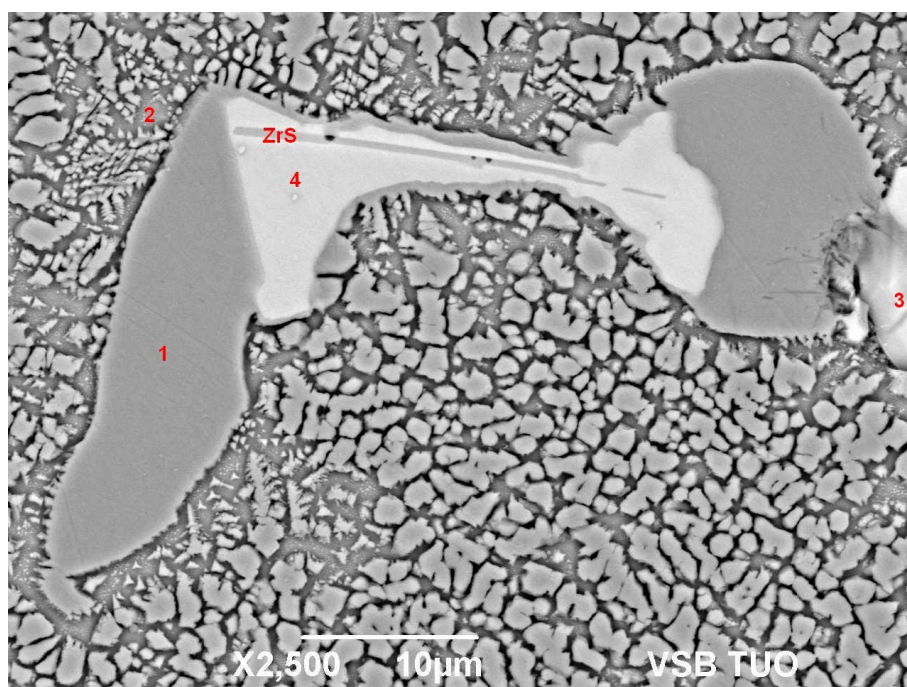


obr. 8: Leptaný stav, líčí dendritická struktura

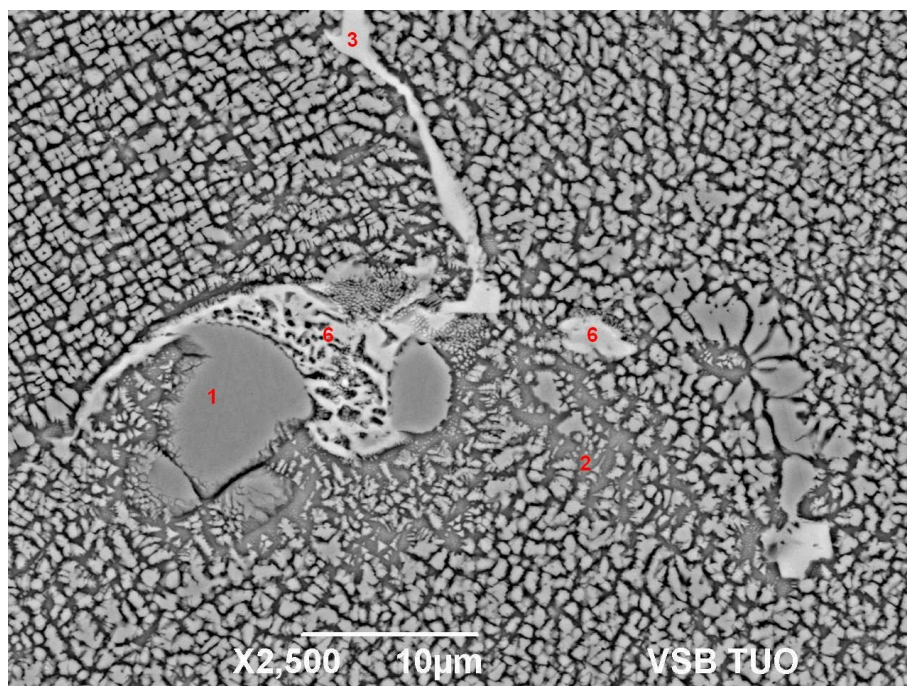


obr. 9: Analyzované fáze

BEC

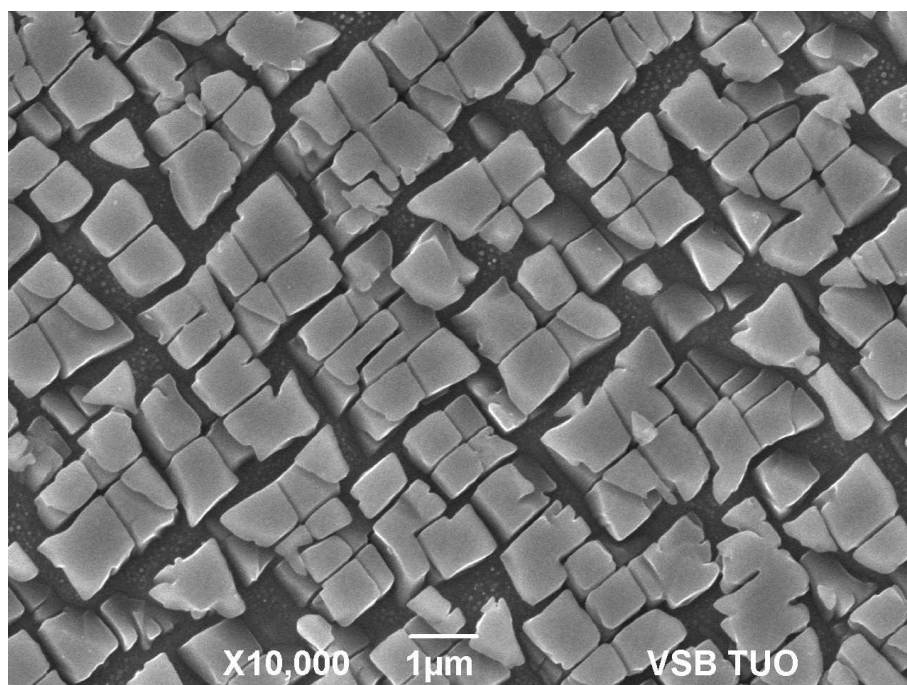


obr. 10: Analyzované fáze , sirník ZrS



obr. 11: Analyzované fáze

BEC



obr. 12: Zpevňující intermetalická fáze γ' uvnitř dendritů

SEI

9. ZÁVĚR

V bakalářské práci byl proveden rozbor niklových superslitin. Byly popsány obecné charakteristiky niklu, včetně jejich rozdělení. Pozornost byla zaměřena zejména na superslitiny niklu, konkrétně superslitinu INCONEL 713LC. U těchto superslitin byl proveden rozbor křivky tečení, která je základní křivkou při hodnocení materiálu a jeho odolnosti proti tečení, čili creepu. Byly uvedeny parametry, které tuto vlastnost ovlivňují. Dále jsme se u superslitin zaměřili na vliv legujících prvků na vlastnosti superslitin, načež jsem se věnoval konkrétní superslitině INCONEL 713LC.

U této superslitiny byla provedena strukturně-fázová analýza, pomocí světelného mikroskopu Olympus GX51 a řádkovacího elektronového mikroskopu JEOL JSM 6490LV. Byl proveden rozbor chemického složení fluorescenční rentgenovou spektrometrií, přičemž bylo zjištěno, že chemické složení odpovídá předepsanému složení pro danou niklovou superslitinu. Naměřené výsledky jsou uvedeny v tab. IV. Strukturně fázovou analýzou byla zjištěna klasická lící struktura, jak prezentuje obr. 8 a obr. 7, kde je vidět počátek vzniku eutektik. Na obrázcích elektronové mikroskopie jsou vyznačeny oblasti identifikovaných minoritních fází, které se v dané struktuře vyskytovaly.

Významnou skutečností byl fakt, že nebyly detekovány TPC fáze, které mají nepříznivý vliv na degradaci dané superslitiny při provozním nasazení. Je možno konstatovat, že ze zjištěných poznatku se jedná o typickou superslitinu INCONEL 713LC, kde v základní austenické matici se vylučují standartní minoritní fáze typické pro tuto strukturu.

10. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Hernas,A., Jonšta,Z., et.al.: Žárupevné oceli a slitiny, 2.vyd.VŠB-TUO, 2009, 392 s. ISBN 978-80-248-2187-0
- [2]Matthew J. Donachie, Stephen J. Donachie: Superalloys: a technical guide, 2.vyd.USA,2002,439 s.ISBN 0-87170-749-7
- [3] Fiala, J. Mentl, V., Šutta, P.: Struktura a vlastnosti materiálů. 1.vyd. Praha: Academia, 2003, 572 s. ISBN 80-200-1223-0
- [4] Ptáček, L., a kol.: Nauka o materiálu II. 2.vyd. Brno: CERN, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-130-4
- [5] Herman,A.: Lití na vytavitelný model [online]. [citováno 2014-05-24]. Dostupné z: <<http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/MPL/presne%20liti%20na%20vytavitelny%20model.pdf>>
- [6] Bartoš, F.: Technologie zhotovení odlitků „NA HOTOVO“ [online]. [citováno 2014-05-24] Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/2618/Bakal%C3%A1%C5%99sk%C3%A1%20pr%C3%A1ce%20-%20NET%20SHAPE.pdf?sequence=1>
- [7] NIKL [online]. [citováno 2014–05-24] Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Nikl>
- [8] Study of Ni/Al Interface Diffusion by Molecular Dynamics Simulation [online] [citováno 2014–05-24] Dostupné z: http://file.scirp.org/Html/4-8101305_4143.htm
- [9] Mazancová,E.: Materiály pro náročné aplikace, [online] katedra materiálového inženýrství, VŠB-TU Ostrava, 2008. Studijní opora,62 s. [citováno 2014-05-26] dostupné z: <http://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/cs/studium-a-vyuka/studijni-opory/636-Mazancova-Materialy-pro-narocne-TA.pdf>
- [10] Mazanec, K.: Fyzikální metalurgie neželezných kovů a složených materiálů. 2.vyd., Ostrava: Vysoká škola báňská, 1987, 148 s.
- [11] PBS Velká Bíteš: Výrobní program přesného lití [online]. [citováno 2014-05-24] Dostupné z: <http://www.pbsvb.cz/vyrobní-program-divize-presneho-liti>
- [12] Chempoint [online] [citováno 2015-20-4] dostupné z: <http://www.chempoint.cz/rentgenova-fluorescencni-spektrometrie>

11. SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obrázek 1: Nikl [7]
- Obrázek 2: Křivka tečení
- Obrázek 3: Historie vývoje žárupevných slitin [1]
- Obrázek 4: Rovnovážný diagram Ni – Al [8]
- Obrázek 5: Lopatky turbodmychadla [11]
- Obrázek 6: Proces vytavitelného modelu [5]
- Obrázek 7: Neleptaný stav, fáze na hranicích dendritů, vznikající eutektika
- Obrázek 8: Leptaný stav, líčí dendritická struktura
- Obrázek 9: Analyzované fáze
- Obrázek 10: Analyzované fáze , sirník ZrS
- Obrázek 11: Analyzované fáze
- Obrázek 12: Zpevňující intermetalická fáze γ' uvnitř dendritů

12. SEZNAM TABULEK

Tabulka I: Nominální chemické složení (%hm.) monokrystalických slitin I. generace[1]

Tabulka II: Nominální chemické složení (%hm.) monokrystalických slitin II. generace[1]

Tabulka III: Nominální chemické složení (%hm.) monokrystalických slitin II. generace[1]

Tabulka IV: Výsledky měření chemického složení (%hm)